

**PERENCANAAN ALTERNATIF GEDUNG KAMPUS FAKULTAS ILMU
BUDAYA UNIVERSITAS BRAWIJAYA MALANG DENGAN MENGGUNAKAN
PROFIL *CASTELLATED BEAM* NON KOMPOSIT
Edy Sulistyanto Raharjo, M. Taufik Hidayat, Eva Arifi**

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono 167 Malang, 65145, Jawa Timur – Indonesia
Email: edysulistyantoraharjo@gmail.com

ABSTRAK

Castellated Beam adalah profil baja yang kekuatan komponen strukturnya bertambah dengan cara memperpanjang profil ke arah satu sama lain dan di las sepanjang pola. Profil ini juga biasa disebut sarang lebah karena memiliki bentuk lubang segi enam menyerupai sarang. *Castellated Beam* ini mempunyai tinggi (h) hampir 50% lebih tinggi dari profil awal sehingga meningkatkan nilai lentur axial, *momen inersia* (I_x), dan *modulus section* (S_x). Badan profil dibuat dicetak *hot - rolled* (molding panas) dengan bentuk I, H, U dan memotong zig – zag. Setengah hasil pemotongan digeser atau dibalik dimana ujung atas kanan dilas dengan ujung bawah kiri, dan sebaliknya. Sehingga lubang yang dihasilkan berbentuk segi enam (*hexagonal*).

Dalam perencanaan ini akan dilakukan analisis struktur gedung dengan material baja *Wide Flange* yang dipotong menjadi baja *Castellated Beam* dengan mutu baja BJ 41. Analisis yang akan dilakukan pada studi ini yaitu dengan menggunakan bantuan *software* SAP 2000. Dalam analisisnya menggunakan 3 dimensi dengan memasukkan beban-beban yang bekerja pada struktur, dengan bentang balok induk sebesar 7,2 meter .

Dari hasil analisis program SAP 2000 digunakan baja *Castellated Beam* 918 x 202 x 13 x 23 yang berasal dari baja *Wide Flange* 612 x 202 x 13 x 23 karena memenuhi kategori penampang kompak, dan harus memenuhi syarat $\phi M_n \geq M_u$ serta perhitungan kuat geser memenuhi syarat $\phi V_n \geq V_u$

Kata kunci : castellated beam; momen inersia; modulus section; wide flange

ABSTRACT

Castellated Beam is a steel profile which the strength of its structure components increased by lengthening the profile towards one another and welded along the pattern. This profile generally called the 'beehive' because its hexagon shape resembles a nest hole. The height (h) of castellated beam is almost 50% higher than the original profile. Thus, castellated beam increases the value of axial bending, the moment of inertia (I_x), and the modulus section (S_x). Web profile is created in hot - rolled (hot molding) to form I, H, U and zigzag cutting. Half of the cutting results are shifted or reversed which in the top right corner, the cutting welded to the bottom left, and also the opposite part of the cutting, so the outcome is in hexagonal form.

This design analyzes the structure of the building using wide flange steel material which cut into castellated beam with the BJ 41 quality of the steel. The analysis of this study uses the help of the SAP 2000 software. The analysis uses a 3-dimension by entering loads which works on the structure, with the beam span of 7.2 meters.

The result of the analysis of SAP 2000, steel castellated beam used 918 x 202 x 13 x 23, originating from the Wide Flange Steel of 612 x 202 x 13 x 23. Because comply the sectional compact category, and must qualify $\phi M_n \geq M_u$ and the calculation of shear strength eligible $\phi V_n \geq V_u$

Keywords: castellated beam; inertia moment; modulus section; wide flange

1. PENDAHULUAN

Dalam teknik sipil, struktur biasanya dibagi menjadi dua bagian, struktur atas dan struktur bawah. Struktur atas berfungsi sebagai pendukung beban kerja pada sebuah bangunan, struktur atas terdiri dari balok, kolom, lantai dan atap. Struktur bawah berfungsi sebagai pendistribusian beban dari atas ke bawah, struktur bawah terdiri dari pondasi. Pembangunan gedung pencakar langit merupakan solusi akan terbatasnya lahan. Sebagai perencana gedung pencakar langit, harus memperhatikan beban - beban pada bangunan seperti gaya seismik dan gravitasi.

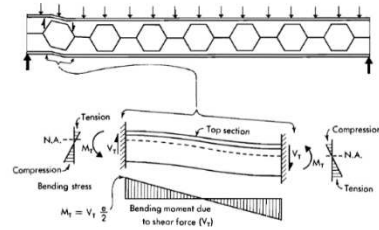
Salah satu bangunan tinggi di kota Malang adalah Kampus Fakultas Ilmu Budaya Universitas Brawijaya Malang. Bangunan ini menggunakan struktur beton bertulang. Perencanaan penggunaan struktur beton bertulang dilakukan karena lebih mudah untuk dilakukan dan tidak memerlukan keahlian khusus dalam pengerjaan, tetapi bagaimana jika bangunan tersebut menggunakan struktur baja. Karena struktur beton ini memiliki kelemahan bahwa bangunan menanggung beban mati relatif besar, sehingga bangunan menjadi kurang efektif untuk menanggung beban yang lebih besar. Kelemahan lain dari struktur beton adalah faktor suhu, waktu, kerja atau produksi beton siap (ready mix). Ditambah berat sendiri pada bangunan, akan lebih besar beban gempa yang harus ditahan bangunan tersebut. Sementara bangunan Kampus Fakultas Ilmu Budaya Universitas Brawijaya Malang menggunakan ukuran balok dan kolom yang besar. Maka membutuhkan perencanaan lebih lanjut, khususnya dengan menggunakan struktur baja. Struktur baja juga memiliki kekurangan dari segi manufaktur dan pemeliharaan, serta struktur baja juga lebih mahal dari struktur beton.

Profil baja *Castellated Beam* adalah hasil pengembangan dari profil baja *Wide Flange Shape*. Salah satu keuntungan dari profil baja *Castellated Beam* adalah bobot yang lebih ringan, tetapi dengan kapasitas momen inersia 1,5 kali lebih besar dari profil *Wide Flange Shape* dengan berat yang sama, sehingga penggunaan baja akan lebih efisien (dalam kg) dan lebih besar menerima momen lentur. *Castellated Beam* belum banyak digunakan di gedung-gedung tinggi.

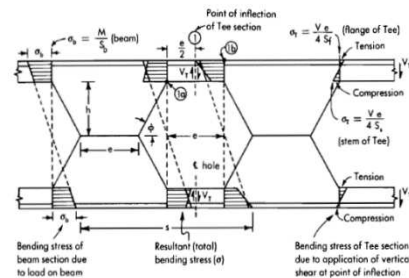
2.1. TINJAUAN PUSTAKA

Castellated Beam adalah profil baja yang kekuatannya komponen strukturnya bertambah dengan cara memperpanjang profil ke arah satu sama lain dan di las sepanjang pola. Profil ini juga biasa disebut sarang lebah karena memiliki bentuk lubang segi enam menyerupai sarang. *Castellated Beam* ini mempunyai tinggi (h) hampir 50% lebih tinggi dari profil awal sehingga meningkatkan nilai lentur axial, momen inersia (I_x), dan modulus section (S_x) (Knowles, 1991). Pada flens profil ini memikul sebagian besar beban lentur, sehingga jika ditinjau dari daya tahan terhadap momen maka seharusnya

pengurangan luas badan profil ini tidak merupakan persoalan. Namun untuk gaya lintang yang dipikul oleh badan profil ini harus diperhatikan atau ditinjau lebih lanjut. Gaya lintang terkecil berada pada tengah bentang sehingga tidak mempengaruhi kekuatan balok.



Gambar 1. Momen lentur akibat gaya lintang.



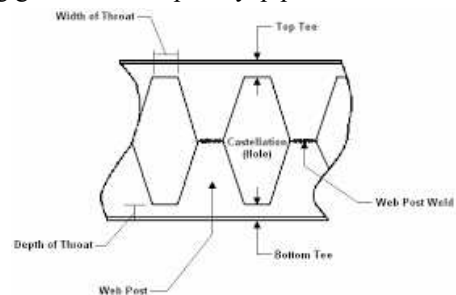
Gambar 2. Tegangan lentur akibat gaya lintang.

Gambar diatas menunjukkan momen lentur akibat gaya lintang, pada bagian potongan T atas dan bawah biasanya merupakan titik balik momen (*point of inflection*) dikarenakan gaya lintang yang dimisalkan terjadi pada tengah lubang ($\frac{e}{2}$). Tetapi jika dimisalkan gaya lintang dipikul sama besar pada bagian atas dan bawah dikarenakan tinggi kedua bagian T itu sama.

2.2. Terminologi

Berikut ini merupakan ilustrasi bagian dari *Castellated Beam* :

- Web Post :Area padat dari Castellated Beam
- Castellation :Area yang telah mengalami pelubangan (hole).
- Throat Width :Perpanjangan horizontal dari potongan “gigi” bawah profil.
- Throat Depth :Tinggi daerah profil potongan “gigi” bawah sampai sayap profil.



Gambar 3. Bagian-bagian *hexagonal castellated beam* (Patrick Bardley, 2007)

3. METODE PENELITIAN

Nama Gedung : Gedung Kampus Fakultas Ilmu
Budaya Universitas Brawijaya

Struktur Gedung: Gedung menggunakan struktur
beton

Jumlah lantai : 8 lantai

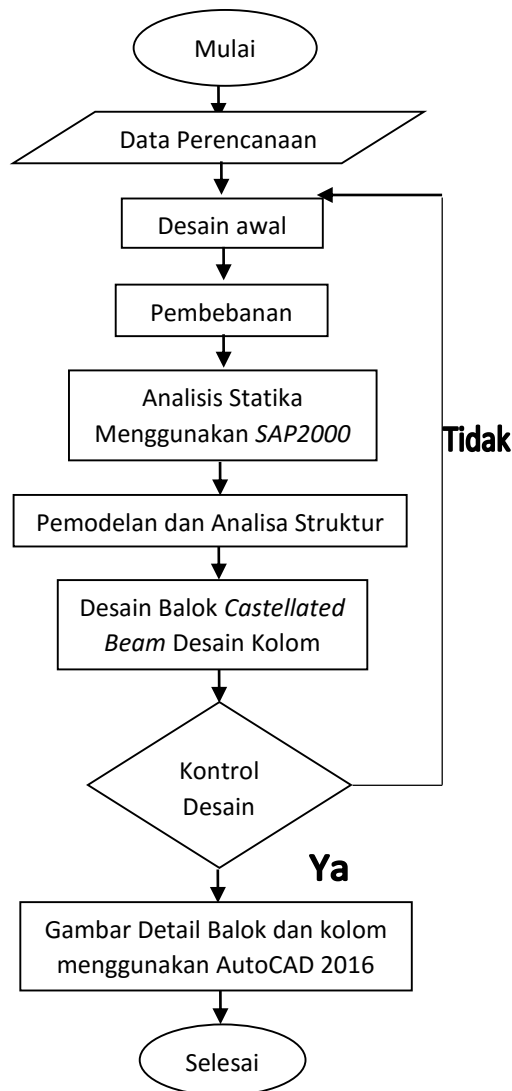
Tinggi Bangunan : $\pm 35,3$ m

Tinggi Lantai : Lantai 1 – Lantai 7 : 4,5 m
Lantai 8 : 2,4 m

Zona Gempa : 4

Data perencanaan : Menggunakan Profil *Castellated Beam* pada balok dan Profil *Wide Flange* pada kolom

3.1. Diagram Alur Perencanaan



4. PEMBAHASAN

Hasil output SAP 2000 v15 akibat beban kombinasi, didapat:

$$M_{\max} = 93208,89 \text{ kgm}$$

$$= 9320889 \text{ kcm}$$

$$V_u = 62038 \text{ kg}$$

Profil WF 612x202x13x23

$$\text{Mutu baja BJ 41, } f_y = 250 \text{ Mpa} = 2500 \text{ kg/cm}^2$$

$$d = 612 \text{ mm}$$

$$b_f = 202 \text{ mm}$$

$$t_w = 13 \text{ mm}$$

$$t_f = 23 \text{ mm}$$

$$I_x = 103000 \text{ cm}^4$$

$$Z_x = 3777,651 \text{ cm}^3$$

$$S_x = 3380 \text{ cm}^3$$

$$\phi = 60^\circ$$

$$r = 22 \text{ mm}$$

$$h = 522 \text{ mm}$$

$$r_y = 43,1 \text{ mm}$$

$$E_s = 200000 \text{ Mpa}$$

$$G = 80000 \text{ Mpa}$$

$$r_x = 246 \text{ mm}$$

$$A_s = 10770 \text{ mm}^2$$

$$I_y = 3180 \text{ cm}^4$$

$$C_w = 2,758 \times 10^{12} \text{ mm}^6$$

$$J = 2052990 \text{ mm}^4$$

$$L = 7,2 \text{ m}$$

4.1. Kontrol Penampang

Cek kelangsingan profil WF

- Pelat Sayap

$$\lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = \frac{170}{\sqrt{250}} = 10,752$$

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{202}{2 \times 23} = 4,391$$

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Penampang Kompak (OK)}$$

- Pelat badan

$$\lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} = \frac{1680}{\sqrt{250}} = 106,253$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{522}{13} = 40,154$$

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Penampang Kompak (OK)}$$

4.2. Perhitungan Dimensi Profil Castellated

(Berdasarkan Jurnal Openned Web Expanded Beam and Girder)

Asumsi, $K1 = 1,5$

$$h = d (K1 - 1)$$

$$= 612 (1,5 - 1) = 306 \text{ mm}$$

$$d_g = d + h = 612 + 306 = 918 \text{ mm}$$

$$b = \frac{h}{\tan \phi} = \frac{306}{1,73} = 176,669 \text{ mm}$$

$$d_T = \frac{dg - 2tf}{2} - h = \frac{918 - 2 \times 23}{2} - 306 = 130 \text{ mm}$$

$$h_o = 2h = 612 \text{ mm}$$

$$e = 0,25 \times h_o = 153 \text{ mm}$$

$$a_o = 2b + e = 506,338 \text{ mm}$$

Maka profil *Wide Flange* menjadi profil *Castellated Beam* dengan data-data sebagai berikut :

$$d_g = 918 \text{ mm}$$

$$b_f = 202 \text{ mm}$$

$$r = 22 \text{ mm}$$

$$h_o = 612 \text{ mm}$$

$$a_o = 506,338 \text{ mm}$$

$$t_w = 13 \text{ mm}$$

$$t_f = 23 \text{ mm}$$

$$h = d_g - 2 (t_f + r) = 828 \text{ mm}$$

$$L = 7,2 \text{ m}$$

4.3. Mencari I_x dan Z_x Pada Profil Castellated

- Pada bagian tanpa lubang

$$\begin{aligned} I_x &= \left(\frac{1}{12} \times b \times dg^3 \right) - \left(2 \times \frac{1}{12} \times \left(\frac{b - tw}{2} \right) \right) (dg - 2tf)^3 \\ &= 13022613972 - 10443113856 \\ &= 2579500116 \text{ mm}^4 \\ &= 257950,0116 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_x &= \left(\frac{tw \times dg^2}{4} \right) - (bf - tw) (dg - tf) \times tf \\ &= 2738853 + 3890565 \\ &= 6629418 \text{ mm}^3 \\ &= 6629,418 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

- Pada bagian berlubang

$$\begin{aligned} I_x &= \left(\frac{1}{12} \times b \times dg^3 \right) - \left(2 \times \frac{1}{12} \times \left(\frac{b - tw}{2} \right) \right) (dg - 2tf)^3 - \\ &\quad \left(\frac{1}{12} \times tw \times (dg - 2tf - 2h)^3 \right) \\ &= 13022613972 - 10443113856 - (-522047829) \\ &= 2057452287 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$= 205745,2287 \text{ cm}^4$$

$$\begin{aligned} Z_x &= \left(\frac{1}{4} \times b \times dg^2 \right) - \left(2 \times \frac{1}{4} \times \left(\frac{b - tw}{2} \right) \right) (dg - 2tf)^2 \times \left(\frac{1}{4} \times tw \times h_o^2 \right) \\ &= 42557562 - 35928144 - 1217268 \\ &= 5412150 \text{ mm}^3 \\ &= 5412,15 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$I_x = I_x \text{ rata - rata}$

$$I_x = \frac{I_x \text{ tanpa lubang} + I_x \text{ berlubang}}{2}$$

$$I_x = \frac{257950,012 + 205745,229}{2}$$

$$I_x = 231847,62 \text{ cm}^4$$

4.4. Kontrol Penampang

Cek kelangsingan profil WF

- Pelat Sayap

$$\lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = \frac{170}{\sqrt{250}} = 10,752$$

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{202}{2 \times 23} = 4,391$$

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Penampang Kompak (OK)}$$

- Pelat badan (ketika solid)

$$\lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} = \frac{1680}{\sqrt{250}} = 106,253$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{828}{13} = 63,692$$

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Penampang Kompak (OK)}$$

Dari kombinasi pembebanan didapat

$$M_u = 93208,89 \text{ kgm} = 9320889 \text{ kgcm}$$

Karena penampang kompak, maka:

$$M_n = M_p$$

$$M_p = F_y \times Z$$

$$= 2500 \times 6629,418$$

$$= 16573545 \text{ kgcm}$$

$$M_p = 1,5 \times M_y$$

$$= 1,5 \times (F_y \times S_x)$$

$$= 1,5 \times 2500 \times 5931,578$$

$$= 22243417,5 \text{ kgcm (Dipilih yang terkecil, maka)}$$

$$\text{diambil } M_p = 16573545 \text{ kgcm}$$

$$\phi M_n = 0,9 \times 16573545$$

$$= 14916190,5 \text{ kgcm}$$

$$\phi M_n \geq M_u$$

$$14916190,5 \text{ kgcm} \geq 9320889 \text{ kgcm (OK)}$$

- Pelat badan (ketika berlubang)

$$\lambda = \frac{dT}{tw} = \frac{130}{13} = 10$$

$$\lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = \frac{170}{\sqrt{250}} = 10,752$$

$$\lambda_R = \frac{370}{\sqrt{f_y - f_R}} = \frac{370}{\sqrt{250 - 70}} = 27,578$$

$\lambda < \lambda_p < \lambda_R$ maka, Penampang Kompak (OK)

Karena penampang kompak maka

$$M_n = M_p$$

$$M_p = F_y \times Z_x$$

$$= 2500 \times 5412,15$$

$$= 13530375 \text{ kgcm}$$

$$M_p = 1,5 \times M_y$$

$$= 1,5 \times (F_y \times S_x)$$

$$= 1,5 \times 2500 \times 5931,578$$

$$= 22243417,5 \text{ kgcm (Dipilih yang terkecil, maka}$$

diambil $M_p = 13530375 \text{ kgcm}$)

$$\Delta A_s = h_o \times tw$$

$$= 61,2 \times 1,3$$

$$= 79,56 \text{ cm}^2$$

Momen lentur nominal (*berdasarkan ASCE journal page 3327*)

$$M_n = M_p - f_y \times \Delta A_s \left(\frac{h_o}{4} + e \right)$$

$$= 13530375 - 99450 \times 30,6$$

$$= 10487205 \text{ kgcm}$$

$$\phi M_n = 0,9 \times M_n$$

$$= 0,9 \times 10487205$$

$$= 9438484,5 \text{ kgcm}$$

$$\phi M_n \geq M_u$$

$$9438484,5 \geq 9320889 \text{ kgcm (OK)}$$

Kontrol tekuk lateral :

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} \cdot r_y$$

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{250}} \cdot 43,1$$

$$L_p = 2153,447 \text{ mm}$$

$$f_L = f_y - f_r$$

$$f_L = 250 - 70$$

$$f_L = 180$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{E_s \cdot G \cdot J \cdot A}{2}}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{3380000} \sqrt{\frac{200000 \cdot 80000 \cdot 2052990 \cdot 10770}{2}}$$

$$X_1 = 12355,468 \text{ MPa}$$

$$X_2 = \frac{4 \cdot C_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{G \cdot J} \right)$$

$$X_2 = \frac{4 \cdot 2,758 \times 10^{12}}{31800000} \left(\frac{3380000}{80000 \cdot 2052990} \right)$$

$$X_2 = 7,139 \text{ mm}^4 / N^2$$

$$L_r = r_y \frac{X_1}{f_L} \sqrt{1 + X_2 (f_L)^2}$$

$$L_r = 43,1 \frac{12355,468}{180} \sqrt{1 + 7,139 (180)^2}$$

$$L_r = 649,485 \text{ mm}$$

$L < L_p$ (Bentang pendek), sehingga $M_n = M_p$

Kontrol kuat geser :

$$\bullet \frac{d - 2tf}{tw} = \frac{872}{13} = 67,077$$

$$\bullet \frac{1365}{\sqrt{f_y}} = \frac{1365}{\sqrt{250}} = 86,33$$

$$\bullet \frac{1100}{\sqrt{f_y}} = \frac{1100}{\sqrt{250}} = 69,57$$

Kontrol tekuk badan (*berdasarkan ASCE journal page 3319*)

$$\bullet \frac{d - 2tf}{tw} \leq \frac{1365}{\sqrt{f_y}}$$

$$67,077 \leq 86,33 \dots \text{ (OK)}$$

$$\bullet \frac{d - 2tf}{tw} \leq \frac{1100}{\sqrt{f_y}}$$

$$67,077 \leq 69,57 \dots \text{ (OK)}$$

$$a_o = 506,338 \text{ mm}$$

$$h_o = 612 \text{ mm}$$

$$\frac{a_o}{h_o} = \frac{506,338}{612} = 0,827 \leq 3,0 \text{ (OK)}$$

$$V_p = f_y \times tw \times \frac{d}{\sqrt{3}}$$

$$= 2500 \times 1,3 \times 7,506$$

$$= 24393,049 \text{ kg}$$

$$P_o = \frac{a_o}{h_o} + \frac{6h_o}{d}$$

$$= \frac{506,338}{612} + \frac{3672}{918}$$

$$= 0,827 + 4$$

$= 4,827 \leq 5,6 \text{ (OK)}$ (Nilai 5,6 adalah untuk baja non komposit)

Untuk tee atas dan bawah :

$$V_{pt} = \frac{f_y \times t_w \times d_t}{\sqrt{3}}$$

$$= \frac{2500 \times 1,3 \times 130}{\sqrt{3}}$$

$$= \frac{422500}{1,73}$$

$$= 243930,489 \text{ kg}$$

$$\mu = 0$$

$$v = \frac{a_o}{d_t} = \frac{506,338}{130} = 3,895$$

$$\frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}} = 0,435 \leq 1 \text{ (OK)}$$

$$V_{nt} = \frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}} \times V_{pt}$$

$$= 0,435 \times 243930,489$$

$$= 106186,127 \text{ kg}$$

$$V_{nt} \leq V_{pt} \rightarrow 106186,127 \text{ kg} \leq 243930,489 \text{ kg}$$

$$V_n = \sum V_{nt} = 2 \times V_{nt} = 2 \times 106186,127$$

$$= 212372,255 \text{ kg}$$

$$\phi V_n = \phi V_n = 0,9 \times V_n = 0,9 \times 212372,255$$

$$= 191135,029 \text{ kg}$$

$$\phi V_n \geq V_u$$

$$191135,029 \text{ kg} \geq 62038 \text{ kg}$$

4.5. Persamaan Interaksi :

$$\left(\frac{M_u}{M_n}\right)^3 + \left(\frac{V_u}{V_n}\right)^3 \leq 1$$

$$\left(\frac{9320889}{9438484,5}\right)^3 + \left(\frac{62038}{191135,029}\right)^3 \leq 1,0$$

$$0,963 + 0,034 \leq 1,0$$

$$0,997 \leq 1,0 \text{ (OK)}$$

4.6. Kontrol Jarak Antar Lubang :

$$S = 2 (b + e) = 2 (176,669 + 153) = 659,338 \text{ mm}$$

$$S \geq h_o = 659,338 \geq 612 \text{ (OK)}$$

$$S \geq a_o \left(\frac{0,282}{1-0,717}\right)$$

$$659,338 \geq 50,634 \times 0,394$$

$$659,338 \geq 19,944 \text{ (OK)}$$

4.7. Kontrol Lendutan

Dari analisis sturktur program SAP2000 di dapat lendutan sebesar 0,02 m atau 2cm pada joint 1424

4.8. Perencanaan Kolom

Profil WF 458 x 417 x 30 x 50

$$B_f = 417 \text{ mm}$$

$$t_f = 50 \text{ mm}$$

$$t_w = 30 \text{ mm}$$

$$r_y = 107 \text{ mm}$$

$$f_y = 250 \text{ MPa}$$

$$f_u = 410 \text{ MPa}$$

$$r_o = 22 \text{ mm}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$G = 80000 \text{ MPa}$$

$$r_x = 188 \text{ mm}$$

$$d = 458 \text{ mm}$$

$$h = d - 2 (t_f + r) = 314 \text{ mm}$$

$$A_s = 52860 \text{ mm}^2$$

$$Z_y = 2244937,5 \text{ mm}^3$$

$$Z_x = 8538841 \text{ mm}^3$$

$$S_x = 8170000 \text{ mm}^3$$

$$I_x = 1870000000 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 605000000 \text{ mm}^4$$

$$C_w = 2,5177 \times 10^{13} \text{ mm}^4$$

$$J = 37972000 \text{ mm}^4$$

$$L = 4500 \text{ mm}$$

4.9. Kontrol Penampang

Cek kelangsingan penampang pada profil WF

- Pelat Sayap

$$\frac{b/2}{t_f} = \frac{208,5}{50} = 4,17$$

$$\frac{250}{\sqrt{f_y}} = \frac{250}{\sqrt{250}} = 15,811$$

$$\frac{b/2}{t_f} < \lambda_r \text{ ... (OK)}$$

- Pelat badan

$$\frac{h}{t_w} = \frac{314}{30} = 10,467$$

$$\frac{665}{\sqrt{f_y}} = \frac{665}{\sqrt{250}} = 42,05$$

$$\frac{h}{t_w} < \lambda_r \text{ ... (OK)}$$

Faktor panjang efektif

Bagian dasar kolom diasumsikan jepit, sehingga $G_A = 1$

Momen inersia kolom WF 458 x 417 x 30 x 50

$$I_x = 187000 \text{ cm}^4$$

Momen inersia Castellated beam 918 x 202 x 13 x 23

$$I_x = 231847,62 \text{ cm}^4$$

Faktor panjang efektif k

$$G_{Bx} = \frac{\sum (\frac{I}{L})_{kolom}}{\sum (\frac{I}{L})_{balok}}$$

$$G_{Bx} = \frac{368805,556}{225407,4085}$$

$$G_{Bx} = 1,63$$

$$G_{By} = \frac{\sum (\frac{I}{L})_{kolom}}{\sum (\frac{I}{L})_{balok}}$$

$$G_{By} = \frac{368805,556}{150271,606}$$

$$G_{By} = 2,45$$

4.9. Akibat portal bergoyang (1,2D + 1L + 1Ex + 0,3Ey)

Akibat portal tidak bergoyang (1,2D+1L)

$$k_{cx} = 0,8 \text{ (dari nomogram diagram)}$$

$$\lambda_c = \frac{k_{cx} \cdot L}{r_x \cdot \pi} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}}$$

$$\lambda_c = \frac{0,8 \cdot 4500}{188 \cdot \pi} \sqrt{\frac{250}{200000}}$$

$$\lambda_c = 0,215$$

Karena $\lambda_c = 0,215$ maka:

$$\omega = 1$$

$$f_{cr} = \frac{f_y}{\omega}$$

$$f_{cr} = \frac{250}{1}$$

$$f_{cr} = 250 \text{ MPa}$$

Kuat rencana nominal

$$N_n = A_s \cdot f_{cr}$$

$$N_n = 52860 \cdot 250$$

$$N_n = 13215000 \text{ N}$$

$$N_n = 1321500 \text{ kg}$$

$$\frac{N_u}{\phi_c \cdot N_n} = \frac{551955,14}{0,85 \cdot 1321500} = 0,49 > 0,2 \text{ Maka menggunakan}$$

$$\text{persamaan } \frac{N_u}{\phi_c N_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0$$

Cek kelangsingan penampang profil

$$\frac{N_u}{\phi_c \cdot N_n} = \frac{551955,14}{0,85 \cdot 1321500} = 0,49 > 0,125$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda = \frac{314}{30}$$

$$\lambda = 10,467$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left(2,33 - \frac{N_u}{\phi_c N_y} \right) > \frac{665}{\sqrt{f_y}}$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{250}} \left(2,33 - \frac{551955,14}{0,85 \cdot 1321500} \right) > \frac{665}{\sqrt{250}}$$

$$\lambda_p = 58,142 > 42,058$$

$$\lambda < \lambda_p$$

$$10,467 < 58,327 \text{ (Maka penampang kompak)}$$

Kontrol tekuk lateral :

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} \cdot r_y$$

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{250}} \cdot 107$$

$$L_p = 5346,147 \text{ mm}$$

$$f_L = f_y - f_r$$

$$f_L = 250 - 70$$

$$f_L = 180$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{E_s \cdot G \cdot J \cdot A}{2}}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{8170000} \sqrt{\frac{200000 \cdot 80000 \cdot 37972000 \cdot 52860}{2}}$$

$$X_1 = 48702,124 \text{ MPa}$$

$$X_2 = \frac{4 \cdot C_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{G \cdot J} \right)$$

$$X_2 = \frac{4 \cdot 2,51777 \times 10^{13}}{605000000} \left(\frac{8170000}{80000 \cdot 37972000} \right)$$

$$X_2 = 0,447 \text{ mm}^4 / \text{N}^2$$

$$L_r = r_y \frac{X_1}{f_L} \sqrt{1 + X_2 (f_L)^2}$$

$$L_r = 107 \frac{48702,124}{340} \sqrt{1 + 0,447 (180)^2}$$

$$L_r = 319040,3 \text{ mm}$$

$$L < L_p$$

$$4500 < 5346,147 \text{ mm} \dots \text{ (Bentang Pendek)}$$

$$\text{Sehingga } M_n = M_p$$

Untuk Mnx

$$M_{px} = Z_x \cdot f_y$$

$$M_{px} = 8538841 \cdot 250$$

$$M_{px} = 2134710250 \text{ Nmm}$$

$$M_{px} = 2134710,25 \text{ kgm}$$

$$M_{px} = 1,5 \cdot M_y$$

$$M_{px} = 1,5 \cdot F_y \cdot S_x$$

$$M_{px} = 1,5 \cdot 250 \cdot 8170000$$

$$M_{px} = 3063750000 \text{ Nmm}$$

$M_{px} = 3063750 \text{ kgm}$ (Dipilih yang terkecil, maka diambil $M_{px} = 2134710,25 \text{ kgm}$)

$$\begin{aligned}\emptyset M_{nx} &= 0,9 \times M_{px} \\ &= 0,9 \times 2134710,25 \\ &= 192123,922 \text{ kgm}\end{aligned}$$

Untuk M_{ny}

$$M_{py} = Z_y \cdot f_y$$

$$M_{py} = 2244937,5 \cdot 250$$

$$M_{py} = 561234375 \text{ Nmm}$$

$$M_{py} = 56123,4375 \text{ kgm}$$

$$M_{py} = 1,5 \cdot M_y$$

$$M_{py} = 1,5 \cdot F_y \cdot S_y$$

$$M_{py} = 1,5 \cdot 250 \cdot 2900000$$

$$M_{py} = 108750000 \text{ Nmm}$$

$M_{py} = 108750 \text{ kgm}$ (Dipilih yang terkecil, maka diambil $M_{py} = 56123,4375 \text{ kgm}$)

$$\begin{aligned}\emptyset M_{ny} &= 0,9 \times M_{py} \\ &= 0,9 \times 56123,4375 \\ &= 50511,093 \text{ kgm}\end{aligned}$$

Menentukan perbesaran momen δ_b M_{ux} :

Hubungan Balok – Kolom

$$M_1 = 3360,89 \text{ kgm}$$

$$M_A = 689,46 \text{ kgm}$$

$$M_B = 1963,96 \text{ kgm}$$

$$M_C = 4626,39 \text{ kgm}$$

$$M_2 = 7288,81 \text{ kgm}$$

$$\frac{k_{cx} \cdot L}{r_x} = \frac{0,8 \cdot 4500}{188}$$

$$\frac{k_{cx} \cdot L}{r_x} = 19,148$$

$$C_m = 0,6 - 0,4 \cdot \left(\frac{M_1}{M_2}\right)$$

$$C_m = 0,6 - 0,4 \cdot \left(\frac{3360,89}{7288,81}\right)$$

$$C_m = 0,4155$$

$$N_{el} = \frac{\pi \cdot E_s \cdot A_g}{\left(\frac{k_{cx} \cdot L}{r_x}\right)^2}$$

$$N_{el} = \frac{\pi \cdot 200000 \cdot 52860}{(19,148)^2}$$

$$N_{el} = 90531037,93 \text{ N}$$

$$N_{el} = 9053103,793 \text{ kg}$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}}$$

$$\delta_b = \frac{0,4155}{1 - \frac{551955,1}{9053103,793}}$$

$$\delta_b = 1,064 \leq 1 \text{ (maka diambil 1,064)}$$

$$\begin{aligned}M_{ux} &= \delta_b \times M_u \text{ maks} \\ &= 1,064 \cdot 7288,81 \\ &= 7762,051 \text{ kgm}\end{aligned}$$

Menentukan perbesaran momen δ_b M_{uy} :

Hubungan Balok – Kolom

$$M_1 = 442,46 \text{ kgm}$$

$$M_A = 183,33 \text{ kgm}$$

$$M_B = 75,8 \text{ kgm}$$

$$M_C = 334,93 \text{ kgm}$$

$$M_2 = 594,06 \text{ kgm}$$

$$\frac{k_{cy} \cdot L}{r_y} = \frac{0,82 \cdot 4500}{107}$$

$$\frac{k_{cy} \cdot L}{r_y} = 34,485$$

$$C_m = 0,6 - 0,4 \cdot \left(\frac{M_1}{M_2}\right)$$

$$C_m = 0,6 - 0,4 \cdot \left(\frac{442,46}{594,06}\right)$$

$$C_m = 0,302$$

$$N_{el} = \frac{\pi \cdot E_s \cdot A_g}{\left(\frac{k_{cy} \cdot L}{r_y}\right)^2}$$

$$N_{el} = \frac{\pi \cdot 200000 \cdot 52860}{(34,485)^2}$$

$$N_{el} = 27912685,71 \text{ N}$$

$$N_{el} = 2791268,571 \text{ kg}$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}}$$

$$\delta_b = \frac{0,302}{1 - \frac{551955,1}{2791268,571}}$$

$$\delta_b = 1,246 \leq 1 \text{ (maka diambil 1,246)}$$

$$\begin{aligned}M_{uy} &= \delta_b \cdot M_u \text{ maks} \\ &= 1,246 \cdot 679,26 \\ &= 740,48 \text{ kgm}\end{aligned}$$

Akibat portal bergoyang (1Ex+0,3Ey)

$$k_{cx} = 1,4 \text{ (dari nomogram diagram)}$$

Menentukan perbesaran momen δ_s M_{ux} :

Hubungan Balok – Kolom

$$\begin{aligned}
M_1 &= 16789,74 \text{ kgm} \\
M_A &= 16873,5 \text{ kgm} \\
M_B &= 16957,27 \text{ kgm} \\
M_C &= 33751 \text{ kgm} \\
M_2 &= 41544,74 \text{ kgm}
\end{aligned}$$

$$\Sigma N_u = 32148,13 + 432474,48 + 551955,1 + 382895,22 = 1399472,93 \text{ kg}$$

$$\frac{k_{cx} \cdot L}{r_x} = \frac{1,4 \cdot 4500}{188}$$

$$\frac{k_{cx} \cdot L}{r_x} = 33,51$$

$$N_{el} = \frac{\pi \cdot E_s \cdot A_g}{\left(\frac{k_{cx} \cdot L}{r_x}\right)^2}$$

$$N_{el} = \frac{\pi \cdot 200000 \cdot 52860}{(33,51)^2}$$

$$N_{el} = 29561155,24 \text{ N}$$

$$N_{el} = 2956115,524 \text{ kg}$$

$$\Sigma N_{el} = 4 \times 2956115,524 = 11824462 \text{ kg}$$

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_u}{\Sigma N_{el}}}$$

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{1399472,93}{11824462}}$$

$$\delta_s = 1,134 \geq 1 \text{ (maka diambil 1,134)}$$

$$\begin{aligned}
M_{ux} &= \delta_s \cdot M_u \text{ maks} \\
&= 1,134 \cdot 41544,74 \\
&= 47121,795 \text{ kgm}
\end{aligned}$$

Menentukan perbesaran momen $\delta_s M_{uy}$:

Hubungan Balok – Kolom

$$\begin{aligned}
M_1 &= 10693,6 \text{ kgm} \\
M_A &= 6385,02 \text{ kgm} \\
M_B &= 2076,43 \text{ kgm} \\
M_C &= 8357,46 \text{ kgm} \\
M_2 &= 12638,48 \text{ kgm}
\end{aligned}$$

$$\Sigma N_u = 22251,44 + 72197,46 + 30320,19 + 31638,34 + 5191,44 + 87262,6 = 248861,5 \text{ kg}$$

$$\frac{k_{cy} \cdot L}{r_y} = \frac{1,45 \cdot 4500}{107}$$

$$\frac{k_{cy} \cdot L}{r_y} = 60,981$$

$$N_{el} = \frac{\pi \cdot E_s \cdot A_g}{\left(\frac{k_{cy} \cdot L}{r_y}\right)^2}$$

$$N_{el} = \frac{\pi \cdot 200000 \cdot 52860}{(60,981)^2}$$

$$N_{el} = 8926749,048 \text{ N}$$

$$N_{el} = 892674,9048 \text{ kg}$$

$$\Sigma N_{el} = 6 \times 892674,9048 = 5356049,429 \text{ kg}$$

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_u}{\Sigma N_{el}}}$$

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{248861,5}{5356049,429}}$$

$$\delta_s = 1,048 \geq 1 \text{ (maka diambil 1,048)}$$

$$\begin{aligned}
M_{uy} &= \delta_s \cdot M_u \text{ maks} \\
&= 1,048 \cdot 12638,48 \\
&= 13254,323 \text{ kgm}
\end{aligned}$$

Periksa persamaan

$$\begin{aligned}
M_{ux} &= \delta_b \cdot M_{ntux} + \delta_s \cdot M_{ltux} \\
&= 7762,051 \text{ kgm} + 47121,795 \\
&= 54883,846 \text{ kgm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{uy} &= \delta_b \cdot M_{ntuy} + \delta_s \cdot M_{ltuy} \\
&= 740,48 + 13254,323 \\
&= 13994,803 \text{ kgm}
\end{aligned}$$

Kontrol kuat tekan lentur :

$$\frac{N_u}{\phi_c N_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{551955,14}{1123275} + \frac{8}{9} \left(\frac{54883,846}{192123,9} + \frac{13994,803}{50511,09} \right) \leq 1,0$$

$$0,991 \leq 1,0 \dots (\text{OK})$$

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Perencanaan alternatif gedung Kampus Fakultas Ilmu Budaya Universitas Brawijaya Malang menggunakan profil *Castellated Beam* non komposit adalah :

1. Dilakukan proses perhitungan yang bertujuan mendapatkan potongan zig-zag dari profil *Wide Flange* untuk mendapatkan lubang dari profil *Castellated Beam* dan dilanjutkan dengan perhitungan struktur sekunder dan primer pada beban-beban yang bekerja.
2. Dilakukan cek perhitungan terhadap profil *Castellated Beam* yang memenuhi kategori penampang kompak, serta perhitungan harus

memenuhi syarat $\phi M_n \geq M_u$ dan perhitungan kuat geser memenuhi syarat $\phi V_n \geq V_u$

5.2 Saran

Berdasarkan hasil perencanaan, diharapkan:

1. Seiring dengan kemajuan teknologi, perhitungan gaya-gaya dalam analisis struktur 3D menggunakan aplikasi merupakan suatu alternatif, akan tetapi dari hasil yang diperoleh harus tetap memperhatikan peraturan-peraturan yang berlaku. Sehingga hasilnya dapat dipertanggung jawabkan.
2. Para perencana juga harus memperhatikan *input* data dalam program analisis struktur, karena kesalahan *input* akan membuat hasil tidak *valid*. Hal kecil yang sering terlupakan adalah satuan, hal-hal kecil seperti ini harus benar diperhatikan.
3. Pemilihan profil yang digunakan harus benar-benar diperhatikan. Sebagai *engineering* merencanakan struktur gedung harus *seefisien* mungkin, salah satu faktornya adalah biaya. Karena tidak dapat dipungkiri biaya adalah faktor yang sangat menentukan dalam suatu proyek. Akan tetapi harus tetap mempertimbangkan batasan-batasan peraturan yang berlaku, sehingga selain *efisien* struktur gedung tersebut dapat bertahan lama.

DAFTAR PUSTAKA

American Institute of Steel Construction, 1999, "*Load and Resistance Factor Design Specification*", Chicago, Illinois.

Journal of Structural Engineering, 1992, "*Proposed Specification for Structural Steel Beams with Web Openings*", ASCE

<http://www.grunbauer.nl/eng/inhoud.htm>

Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung (PPIUG) 1983. "Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung Menggunakan Metode LRFD".

Standar Nasional Indonesia 03 – 1726 – 2002
Tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung.

Standar Nasional Indonesia 03 – 1729 – 2002
Tentang Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung.

Setiawan, Agus, 2008. "Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD (Sesuai Dengan SNI 03 – 1729 – 2002). Semarang: Erlangga.

W. Blodgett, Omet. 1966. "*Design Of Welded Structures*". U.S.A: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation